

# 臭蜣螂唇基切土减阻的力学分析\*

吴娜<sup>1</sup> 张伏<sup>2</sup> 佟金<sup>3</sup>

(1. 山东交通学院汽车工程系, 济南 250023; 2. 河南科技大学车辆与动力工程学院, 洛阳 471003;  
3. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

**【摘要】** 对臭蜣螂头部的激光三维扫描点云进行简化处理, 在三维坐标系中建立垂直平面截取部分唇基实体, 并将其简化为三面楔模型, 进行不同运动方向的受力分析。结果表明, 在臭蜣螂挖土打洞过程中唇基有利的挖土切割方式主要为滑移切割, 这种切割方式基于唇基天然的优化形状, 即半圆形的刃口形状和特定的曲面变化。并发现唇基曲面形状对减小挖掘阻力具有重要作用。最后分析了臭蜣螂唇基潜在的仿生应用, 其天然优化的形状和切割角的自动调节可指导地面机械的仿生设计。

**关键词:** 臭蜣螂 仿生学 三面楔 减阻 数学模型

**中图分类号:** Q964; TG806; Q811 **文献标识码:** A

## Mechanical Analysis of Clypeus Surface of Dung Beetle (*Copris ochus* Motschulsky) in Soil-cutting Resistance Reduction

Wu Na<sup>1</sup> Zhang Fu<sup>2</sup> Tong Jin<sup>3</sup>

(1. Department of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Ji'nan 250023, China  
2. Vehicle and Power Engineering Institute, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China  
3. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

### Abstract

The 3-D point data of the clypeus surface of the dung beetle (*Copris ochus* Motschulsky) were simplified, and a 3-section wedge model was used for analyzing the applied force of the half clypeus surface in several directions. It was found that the advantageous mode of the clypeus in soil cut is the sliding cutting as a result of the optimized geometrical configuration of the clypeus of the dung beetle, through evolution over millions of years, which plays an important role in cutting resistance reduction of the clypeus. The potential applications of the clypeus in bionic cutting resistance reduction were analyzed.

**Key words** Dung beetle (*Copris ochus* Motschulsky), Bionics, 3-section wedge, Resistance reduction, Mathematical model

### 引言

生物特性为人类解决科学技术问题提供了灵感,许多科技成果都源于仿生思维<sup>[1]</sup>:根据鸟的飞行研制发明了飞机;根据蝙蝠的超声定位原理发明了雷达;根据鲨鱼皮表面的形态制造了减阻泳衣;根

据天然的钩状结构发明的连接技术,等。目前,对臭蜣螂的仿生学研究已涉及到表面形态<sup>[2~5]</sup>、外部器官<sup>[6~8]</sup>、内部组织<sup>[9~11]</sup>、视觉功能<sup>[12~13]</sup>等许多方面,这些研究为优化触土部件的宏观形状、机械部件的减粘降阻、生物复合材料研制以及空间导航定位提供了仿生原型,同时也表明了臭蜣螂具有重要的

收稿日期: 2008-10-27 修回日期: 2008-11-14

\* 国家自然科学基金资助项目(50675087)、国家杰出青年科学基金资助项目(50025516)和教育部科学技术研究重点项目(106061)

作者简介: 吴娜,副教授,博士,主要从事生物外形及减阻力学研究,E-mail: wuna1978@163.com

通讯作者: 佟金,教授,博士生导师,主要从事地面机械仿生技术研究,E-mail: jtong@jlu.edu.cn

工程仿生研究应用价值。本文在臭蜣螂唇基表面轮廓曲线数学模型建立及分析<sup>[8]</sup>的基础上,对模型进行力学分析,进而探讨臭蜣螂唇基潜在的仿生应用。

### 1 数据提取

试验用雌性成年臭蜣螂 (*Copris ochus* Motschulsky)唇基如图 1a 所示。数据采集时将臭蜣螂平行放置于激光三维扫描仪试样平台底面。采用数据分割的方法获得唇基数据(数据点云见图 1b 所示)<sup>[8]</sup>。将臭蜣螂唇基数据进行平滑和精简等处理。然后基于唇基的左右对称性,提取半个唇基的数据点云进行模型化。

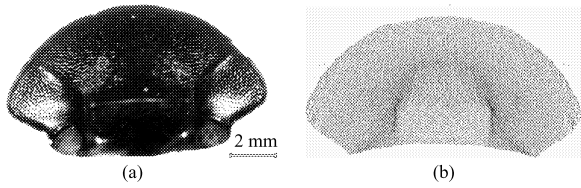


图 1 试验用雌性成年臭蜣螂唇基和唇基表面三维激光扫描点云

Fig.1 Photograph of the clypeus of a female dung beetle (*Copris ochus* Motschulsky)

(a) 试验用雌性成年臭蜣螂唇基 (b) 唇基表面三维激光扫描点云

## 2 臭蜣螂唇基模型及其切土机理分析

### 2.1 臭蜣螂唇基的模型

提取臭蜣螂半个唇基的扫描数据点云,将其放置在三维坐标系中,如图 2 所示。沿  $OY$  方向建立垂直平面  $B'C'D'$ ,  $B'C'D'$  与唇基曲面相交于曲线  $B'C'$ 。线  $C'D'$ 、 $B'D'$  垂直于  $OX$  轴。曲线  $B'C'$  与  $B'D'$  线间的夹角为  $\beta'$ , 曲线  $C'A'$  与  $OX$  轴间的夹角为  $\alpha'$ , 曲线  $A'B'$  与  $OX$  轴间的夹角为  $\theta'$ 。这样曲面  $A'B'C'$  与平面  $OXY$  形成曲面体  $A'C'B'D'$ 。为研究臭蜣螂唇基在推土时受力情况,将曲面体  $A'C'B'D'$  简化为三面楔模型  $ACBO$  进行研究,如图 3 所示。其中,  $\angle CAO$  为  $\alpha$ ,  $\angle CBO$  为  $\beta$ ,  $\angle OAB$  为  $\theta$ 。同时假定三面楔的  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\theta$  均不变化。

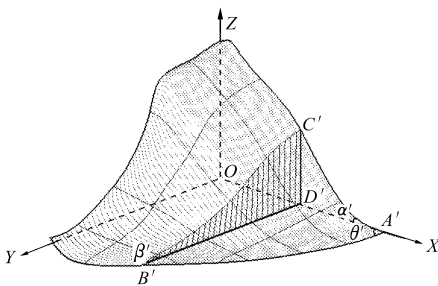


图 2 臭蜣螂唇基水平放置于三维坐标系

Fig.2 Clypeus surfaces of dung beetle (*Copris ochus* Motschulsky) in 3-D coordinate system

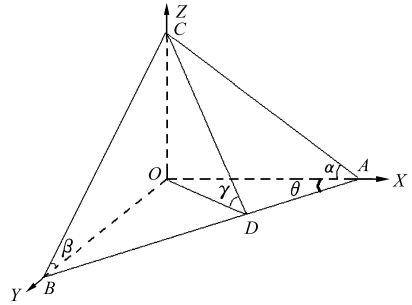


图 3 三面楔模型简图

Fig.3 Model of 3-section wedge

### 2.2 臭蜣螂唇基的切土机理分析

#### 2.2.1 沿三面楔的楔尖 $OX$ 轴方向运动

假设臭蜣螂推土时唇基的运动沿  $OX$  轴方向平动,在  $OX$  轴与刃口成  $\theta$  角的条件下,当底面  $OAB$  沿  $OX$  方向移动位移  $OA$  时,土壤沿刃口的位移为  $AD$ ,土壤的绝对位移为  $OD$ ;假定  $OD$  垂直于  $AB$ 。当土粒沿  $OD$  移动时,由于楔角  $\gamma$  ( $\gamma$  在垂直于刃口的铅垂面上)的存在,土壤被挤压产生向上移动。所以,如图 4 所示,土壤的运动为由  $OD$  和相对位移  $AE$  所构成的绝对位移  $OE$ ,  $OE$  垂直于楔面  $ABC$ 。当楔子沿  $OX$  轴方向运动时,楔面的受力状态如图 5 所示。

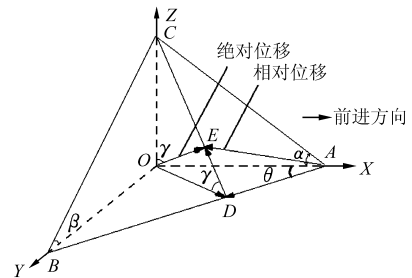


图 4 土壤沿三面楔运动的位移图

Fig.4 Displacement of soil moving along  $OX$  direction

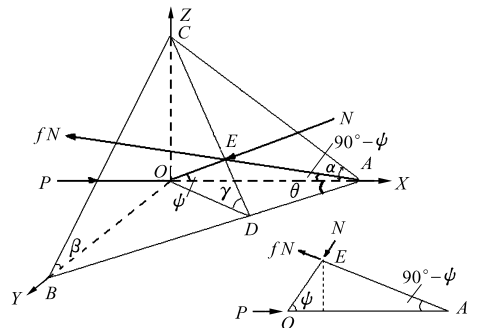


图 5 三面楔沿  $OX$  方向前进时的受力状态

Fig.5 Situation of the force applied on 3-section moving along  $OX$  direction

此时,沿  $OX$  方向移动楔子所需水平力为

$$P = N \sin(90^\circ - \varphi) + fN \cos(90^\circ - \varphi) = N [\sin(90^\circ - \varphi) + \tan \varphi \cos(90^\circ - \varphi)] = \frac{N}{\cos \varphi} \sin(90^\circ - \varphi + \varphi) \quad (1)$$

其中  $f = \tan \varphi$   
 式中  $N$ ——作用于楔面  $ABC$  上的正压力,其大小决定于楔面上土堡重力  $G$  和压缩土壤阻力  
 $f$ ——土壤对楔面的摩擦因数  
 $\varphi$ ——土壤与楔面的摩擦角  
 $\psi$ ——正压力  $N$  的方向与  $OX$  轴形成的夹角

### 2.2.2 沿三面楔的刃口 $OD$ 方向的运动

如果三面楔沿  $OD$  方向运动,此时三面楔相当于两面楔,则楔子的运动垂直于刃口方向(图 6),土壤对楔面的摩擦力沿  $DC$  方向, $O$  点土壤移动的绝对位移为  $OE$ (由位移  $OD$  和相对位移  $DE$  构成)。与沿  $OX$  方向运动的绝对位移相同,但此时楔子所需要的作用力为

$$P' = N \sin \gamma + f N \cos \gamma = N \sin \gamma + N \cos \gamma \tan \varphi = \frac{N}{\cos \varphi} (\sin \gamma \cos \varphi + \cos \gamma \sin \varphi) = \frac{N}{\cos \varphi} \sin(\gamma + \varphi) \quad (2)$$

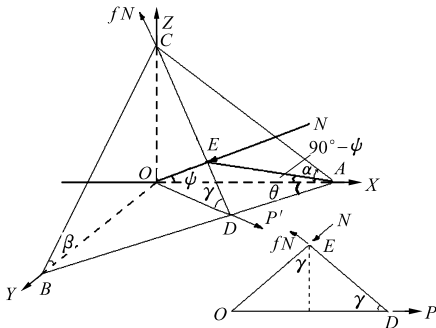


图 6 三面楔沿垂直于刃口方向移动时所受的力  
 Fig. 6 Mechanics moving along  $OX$  direction

### 2.2.3 不同运动方向的切割机理分析

根据立体几何原理,两空间平面所成的交角,以垂直于两平面交线的平面上的角度为最大,即  $\gamma > 90 - \psi$ ,式(1)和式(2)中, $P < P'$ ,计算中均没有考虑三面楔运动中沟底和沟壁对楔子的压力及所产生的摩擦力。所以,使三面楔沿楔尖方向运动所需要的水平力较沿垂直于刃口方向移动时所需要的力小,即三面楔沿楔尖方向运动所受到的阻力较小。主要原因是当三面楔沿  $OX$  轴方向运动时三面楔刃口存在滑移切割。滑移切割就是在切割时,运动方向与刃口不垂直。滑移切割可以减轻阻力。而当三面楔的运动方向与刃口垂直运动时刃口产生垂直砍切,会增大切割阻力。

## 3 讨论

臭蛭螂在挖土打洞的过程中,首先用唇基刃口切削洞面土壤,然后用前足向后扒浮土,当浮土达到一定的数量后,臭蛭螂则转身利用唇基将浮土推出

洞外<sup>[14]</sup>。由于臭蛭螂的唇基刃口为圆弧形,这就使得臭蛭螂的唇基在推土运动时,其运动方向只可能在极小范围内与唇基刃口垂直,而使刃口产生垂直砍切;而其余大部分情况下的运动方向均与唇基刃口间存在夹角,就可以使唇基刃口的大部分产生滑移切割,从而减小切割阻力<sup>[15]</sup>。臭蛭螂的唇基刃口很好地利用了滑移切割原理。

当臭蛭螂用唇基挖土时,切削角保持在  $45^\circ \sim 52^\circ 51'$ <sup>[16]</sup>。随着切削角的增加,其唇基遇到的切割阻力和由于压力产生的摩擦力均会增加,但通过唇基刃口滑移切割的方式会明显减小这种切割阻力,同时唇基表面存在棱纹和凸包型的几何结构也会降低唇基表面与土壤间所产生的摩擦阻力。

三面楔中  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\theta$  和  $\gamma$ (图 3)的综合作用使三面楔同时具有碎土、推土和翻土的作用。

$\alpha$  为切土角,是  $\overline{AC}$  与  $OX$  轴的夹角,是影响切土和碎土性能的重要因素。当  $\alpha$  角随唇基曲面的高度上升并逐渐增大时,土堡沿楔面上升过程中被急剧的弯曲,不断受到剪切作用而被破碎。但增加  $\alpha$  角会同时增大受到的切土阻力。

$\gamma$  为碎土角,是垂直于刃口  $\overline{AB}$  的截面  $OCD$  与楔面的交线  $\overline{CD}$  与沟底  $\overline{OD}$  间的夹角。 $\gamma$  角影响楔面的碎土性能。 $\gamma$  角越大则碎土性能越强,但同时阻力也会增加。

$\theta$  为推土角,是刃口  $\overline{AB}$  与  $XOZ$  平面之间形成的夹角。 $\theta$  角影响推土、碎土和切土的性能。当  $\theta$  角增大时,碎土性能增强,但侧向推土和滑移切土性能降低,阻力增大。 $\theta$  角以小为宜。

$\beta$  为翻土角,是  $\overline{BC}$  棱边与水平面的夹角, $\beta$  角大小由楔角  $\theta$  和  $\gamma$  决定,其关系为  $\tan \beta = \tan \gamma \cos \theta$ 。当  $\theta$  和  $\gamma$  中任一角度发生变化时, $\beta$  角即会发生变化,随  $\gamma$  角的增大而增大,随  $\theta$  角的增大而减小。当  $\beta$  角沿  $OX$  轴负向递增时会具有翻土作用。

由臭蛭螂唇基点云和唇基轮廓曲线的分析可知<sup>[8]</sup>,臭蛭螂唇基为曲面变化,在刃口后有环状的凹槽存在,而后曲面只在中间呈凸状上升。臭蛭螂唇基的这种曲面具有变化的  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\theta$  和  $\gamma$ ,使唇基更好的实现推土、切土和碎土的功能<sup>[17]</sup>。同时臭蛭螂在挖土时会通过头部的转动自动调节楔角的大小以适应推土和挖土的不同功能,减小推土阻力和挖掘阻力。自然状态下,唇基刃口平行于地面。当臭蛭螂头部向下转动将刃口切削角  $\alpha$  增大到  $45^\circ \sim 52^\circ 51'$ ,但由于刃口后有凹槽结构存在,使刃口后面曲面的  $\alpha$  角稍微增大。凹槽后  $\alpha$  角随高度增大而快速增大,这就使刃口切割下的土堡易于沿唇基凹槽上升,不会由于土壤压缩对刃口产生大的阻力,同

时刃口切割下来的土沿唇基曲面经过凹槽后,由于凸状曲面 $\alpha$ 角的快速增加使土袋受到越来越大的剪切作用而破碎松散,沿唇基的边缘曲面向头部后方。如果唇基中间没有凸状曲面存在,则唇基曲面的碎土能力会明显下降,同时也会影响唇基在挖土过程中的侧向推土能力。在刃口的切削角增大的过程中, $\theta$ 角和 $\beta$ 角基本不变,而 $\gamma$ 角会相应增加。但唇基刃口后的 $\gamma$ 角变化很小。

臭蜣螂唇基的形状使得臭蜣螂在挖土打洞的过程中受到较小的阻力。同时通过臭蜣螂头部的转动实现楔角大小的自动调节,更好地实现推土和挖土的不同功能,减小推土阻力和挖掘阻力。唇基天然的优化形状和切割角度的自动调节对土方机械和农业机械触土部件表面的设计和优化将具有仿生学指导意义。通过将受力曲面研究设计为仿生曲面,并合理运用滑移切割原理,同时通过部件的角度调整

实现触土部件不同功能的相互转化,即可实现对触土部件的功能优化和结构创新。

#### 4 结束语

臭蜣螂唇基半圆形刃口形状及其特定的唇基曲面形状使其在挖土的过程中采用滑移切割的原理;同时存在于唇基表面上的凹槽和中部的凸起使唇基具有变化的切土角 $\alpha$ 、翻土角 $\beta$ 、推土角 $\theta$ 和碎土角 $\gamma$ ,有利于更好的实现切土、翻土、推土和碎土的功能。同时臭蜣螂在挖土时会通过头部的转动自动调节楔角以适应推土和挖土的不同功能,使其减小在推土和挖掘过程中的阻力。臭蜣螂唇基具有的优良力学性能取决于唇基的刃口形状和曲面变化,这种天然优化结构对地面机械的切土部件的仿生减阻设计和优化具有指导意义。

#### 参 考 文 献

- 1 Lu Y. Significance and progress of bionics[J]. J. Bion. Eng., 2004, 1(1): 1~3.
- 2 Parker A R, Lawrence C R. Water capture by a desert beetle[J]. Nature, 2001, 414: 33~34.
- 3 Ren Luquan, Tong Jin, Li Jianqiao, et al. Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components: a review[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 79(3): 239~263.
- 4 Tong Jin, Moayad B Z, Ren Luquan, et al. Biomimetics in soft terrain machines: a review[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2004, 13(1~2): 71~86.
- 5 吴娜, 佟金, 陈东辉, 等. 基于逆向工程技术的蜣螂外形数据采集及处理[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 117~121.  
Wu Na, Tong Jin, Chen Donghui, et al. Measurement of geometrical configuration of dung beetle *Copris ochus* Motschulsky using reverse engineering methods[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 117~121. (in Chinese)
- 6 Krasnov B, Ward D, Shenbrot G. Body size and leg length variation in several species of darkling beetles (Coleoptera: Tenebrionidae) along a rainfall and altitudinal gradient in the Negev Desert (Israel)[J]. Journal of Arid Environments, 1996, 34(4): 477~489.
- 7 佟金, 吴娜. 臭蜣螂唇基表面轮廓曲线数学模型建立及分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 113~116.  
Tong Jin, Wu Na. Mathematical model and analysis of profiles of the clypeus surface of dung beetle *Copris ochus* Motschulsky[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 113~116. (in Chinese)
- 8 Tong Jin, Sun Jiyu, Chen Donghui, et al. Geometrical features and wettability of dung beetles and potential biomimetic engineering applications in tillage implements[J]. Soil & Tillage Research, 2005, 80(1): 1~12.
- 9 Tong Jin, Sun Jiyu, Chen Donghui, et al. Factors impacting nanoindentation testing results of the cuticle of dung beetle *Copris ochus* Motschulsky[J]. Journal of Bionics Engineering, 2004, 1(4): 221~230.
- 10 孙霁宇, 佟金, 闫久林, 等. 臭蜣螂股节表皮纳米力学性能测试[J]. 农业机械学报, 2004, 35(5): 157~160.  
Sun Jiyu, Tong Jin, Yan Jiulin, et al. Property tests of nano-indentation on femur cuticle of dung beetle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5): 157~160. (in Chinese)
- 11 Dacke M, Nilsson D E, Scholtz C H, et al. Animal behaviour: insect orientation to polarized moonlight[J]. Nature, 2003, 424: 33.
- 12 Byrne M, Dacke M, Nordström P, et al. Visual cues used by ball-rolling dung beetles for orientation[J]. J. Comp. Physiol. A, 2003, 189(6): 411~418.
- 13 任露泉, 丛茜, 陈秉聪, 等. 几何非光滑典型生物体表粘特性的研究[J]. 农业机械学报, 1992, 23(2): 201~206.  
Ren Luquan, Cong Qian, Chen Bingcong, et al. A study on the adhesion reducing character of geometric nonsmooth surface of typical animal[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1992, 23(2): 201~206. (in Chinese)

- of Mechanical Engineering, 1996, 32(5): 41~46. (in Chinese)
- 5 安子军,曲志刚,王广欣. 基于模糊理论的摆线钢球传动行星传动接触疲劳强度可靠性研究[J]. 中国机械工程,2002, 13(23):2 010~2 012.  
An Zijun, Qu Zhigang, Wang Guangxin. Research on reliability based on fuzzy theory for contact fatigue strength of cycloid steel ball planetary transmission[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(23):2 010~2 012. (in Chinese)
- 6 Zhou Jianjun, Chen Zichen. Study and performance test of full complement cycloid ball reducer with ceramic ball as its gear teeth[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2001, 14(4): 245~251.
- 7 Yang Zuomei, An Zijun, Zhang Peng. Manufacturing mathematic models and meshing analysis for the cycloid grooves of the cycloid ball planetary drive[C]//Proceedings of 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation Vol 2, 2009:89~92.
- 8 孙桓. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,1996.
- 9 李瑰贤. 空间几何建模及工程应用[M]. 北京:高等教育出版社,2007.
- 10 吴大任,骆家舜. 齿轮啮合理论(附微分几何简介)[M]. 北京:科技出版社,1985.
- 11 饶振刚. 行星传动机构设计[M]. 北京:国防工业出版社,1980.
- 12 吴勤保. 双摆线钢球减速器齿廓曲线参数的选择[J]. 机械设计,2007,24(7):64~66.  
Wu Qinbao. Selection on curve parameters of tooth profile in the double cycloid steel ball reducer[J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(7): 64~66. (in Chinese)

(上接第 210 页)

- 14 镇江农业机械学院,吉林工业大学. 农业机械理论及计算[M]. 北京:中国工业出版社,1961.
- 15 韩志武,杨永海,任露泉,等. 推土铲仿生分析与可视化设计[J]. 农业机械学报,2001,32(4):4~6.  
Han Zhiwu, Yang Yonghai, Ren Luquan, et al. Bionic analysis and visual design of a bulldozing blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001,32(4):4~6. (in Chinese)
- 16 北京农业机械学院. 农业机械学[M]. 北京:农业出版社,1981.

## 欢迎订阅《农业工程学报》

《农业工程学报》是由中国科学技术协会主管、中国农业工程学会主办的全国性学术期刊。被列为中国科技期刊引证报告(CJCR)分析和中国科学引文数据库(CSCD)的源期刊、全国中文核心期刊;被《农业科学——农业工程文摘》、美国工程索引(Ei Compendex)、俄罗斯《文摘杂志》、英联邦农业局国际生物中心(CAB International)、美国剑桥科技文摘(CSA)等国内外多家权威检索机构收录;被万方数据网中国数字化期刊群、中国科技期刊网、中国学术期刊(光盘版)全文上网收录。2009年被中国科技信息研究所文献分析中心遴选为“首批精品科技期刊”,被中国科协评为“精品期刊工程项目”期刊。

《农业工程学报》主要栏目有农业水土工程、农业装备工程与机械化、农业信息与电气技术、农业生物环境与能源工程、土地整理工程、农产品加工工程。

《农业工程学报》为月刊,大16开本,每期300页左右。中国标准连续出版物号:ISSN 1002-6819, CN 11-2047/S,邮发代号:18-57。每期定价50元,全年共600元,直接向编辑部订阅,可享受八折优惠。

编辑部地址:北京市朝阳区麦子店街41号,100125

电话/传真:010-65910066 转 2503 或 3503/010-65929451

电子信箱:tcsae@tcsae.org tcsae@sohu.com

期刊网址:www.tcsae.org